第38卷 第2期
2021年3月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 38 No. 2
Mar. 2021

基于风险评估的新疆抗虫棉种植分析

王振霖[1,2]， 吕昭智[1]， 张 鑫[1]， 刘永建[3]

（1. 荒漠与绿洲生态国家重点实验室，中国科学院新疆生态与地理研究所，新疆 乌鲁木齐 830011；
2. 中国科学院大学，北京 100049；3. 新疆生产建设兵团第八师一二一团农业发展服务中心，新疆 石河子 832000）

摘 要：基于新疆棉铃虫生物学特性和多年的种群动态趋势，并在收集棉花种植面积、产量、棉花市场价格及棉铃虫防治费用等相关数据的基础上，采用种群模拟模型（CLIMEX模型）并结合随机模拟方法（@RISK软件），评估不同场景下棉铃虫对新疆棉花产业造成的潜在经济损失。棉铃虫种群模拟表明：随着未来气候变化，新疆棉铃虫的周增长指数（GIw）会增加，棉铃虫越冬蛹羽化的日期明显提前，危害风险可能增加；2种模拟场景结果表明，抗虫棉能有效地降低棉铃虫造成的危害，减少单位面积防治成本。建议新疆相关部门未来可通过种植抗虫棉与害虫综合治理策略（IPM）的有机结合，来减少棉铃虫及次要害虫造成的损失。

关键词：棉铃虫；CLIMEX；抗虫棉；IPM；@RISK

棉铃虫*Helicoverpa armigera*（Hübner），隶属鳞翅目（Lepidoptera），夜蛾科（Noctuidae），铃夜蛾属（*Helicoverpa*），是棉花、玉米和蔬菜等作物的害虫。20世纪60—80年代，棉铃虫就对新疆棉花造成过严重危害，80—90年代相对较轻。90年代后，棉铃虫危害又逐年加重，到了21世纪，每年棉铃虫的发生面积约占棉花种植总面积的60%[1]。为了有效控制棉铃虫的危害，我国从1997年开始引入抗虫棉并进行了商业化和规模化的种植[2-3]，有效遏制了棉铃虫的危害和暴发，取得了重大的经济、生态和社会效益[4]。

温度是最直接影响昆虫的非生物因素[5]。1980年以来，新疆气候变化明显，对区域内水资源与农牧业的发展造成一定的威胁[6]。朱剑等[7]的研究表明，未来气温升高使新疆大部分地区更适合棉铃虫的生存及其种群繁殖，这将对棉花产业产生重大影响。

目前，国际上采用模型模拟有害生物造成的经济损失已成为主流，特别是基于随机模拟方法的评估[8-10]。Cook等[11]建立了一个考虑均衡贸易的模型，并与有害生物扩散模型相结合，采用@RISK软件评估了进口新西兰苹果引入梨火疫病（Fire Blight）的潜在经济损失。Ros等[12]评估了不同防治策略场景下斑翅果蝇（*Drosophila suzukii*）对意大利经济可能造成的损失。Taylor等[13]提出了一个生物经济模型，用于评估葡萄霜霉病引入澳大利亚西部后，对葡萄产业产生的经济影响。国内也有一些类似研究，如桔小实蝇（*Bactrocera dorsalis*）、瓜实蝇（*B. cucurbitae*）和南亚果实蝇（*B. tau*）对广东省农作物造成的经济损失[14]，瓜实蝇给我国苦瓜产业带来的潜在经济损失[15]以及草地贪夜蛾（*Spodoptera frugiperda*）入侵后造成的潜在经济损失[16]，证明采用随机模拟的方法对有害生物的经济损失进行评估是可行的。

新疆凭借得天独厚的光热资源成为我国重要的优质棉主产区[17-19]，直接决定了我国棉花产量与质量[20-21]。新疆2017年棉花总播种面积已达到2.22×10^6 hm^2，棉花产量4.57×10^6 t，比2016年分别增长了23%和27%，其中，主要棉区抗虫棉种植面积比例已接近60%[3]。本研究在收集新疆棉花种植面积及产量、棉花市场价格与棉铃虫防治费用等相关数据的基础上，采用种群模拟（CLIMEX模型）和@RISK软件随机模拟方法，预测未来2种场景下棉铃虫可能对新疆棉花产业造成的潜在经济损失，以期为未来棉铃虫灾害的防治提供依据。

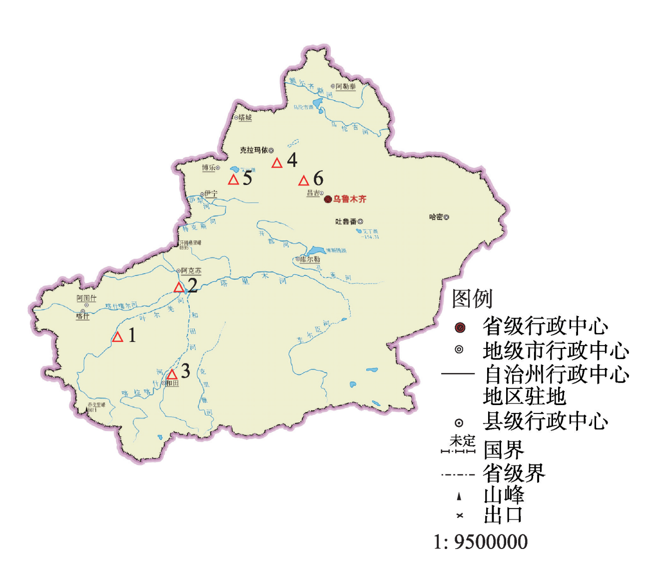
收稿日期：2019-10-29； **修订日期：**2020-07-10
基金项目：中塔棉花有害生物综合治理及其示范项目（Y362101001）资助
作者简介：王振霖(1993-)，男，硕士研究生，主要研究昆虫生态. E-mail: wangzl806@126.com
通讯作者：吕昭智. E-mail: zhaozhi_lv@sina.com

1 材料与方法

1.1 CLIMEX模型及参数

CLIMEX模型是由澳大利亚联邦科学与工业研究组织（Commonwealth Scientific 和 Industrial Research Organization，CSIRO）开发，主要用于探索气候对生物分布的影响，并预测生物的潜在分布、未来趋势变化和种群增长潜力[22]。本研究基于CLIMEX 3.0软件，选取棉铃虫为模拟对象，模型参数来源选取zalucki（2014年）的研究[23]。为了研究未来气候变化下棉铃虫种群增长趋势，采用1975年（以1975年为中心的30 a，将该数据默认为，当前气候下的气候数据）和2100年（未来气候数据）空间地理分辨率为10′的区域气候数据，数据来源于CLIMOND网站（https://www.climond.org）。根据棉花全生长期的需水规律，需要在自然降水的基础上添加灌溉才能满足棉花正常生长发育，又因棉花不同生长时期需水情况不同，结合近30 a以来，中国棉花需水量变化特征[24]，估算出每亩棉花需要的灌溉量，将模型中的灌溉量换算成每日的降水量[25]，设置全年降雨为2.5 mm·d。

棉铃虫种群变化过程的模拟选取新疆6个点（图1），依次为1：麦盖提县（38.88°N，77.62°E）、2：阿瓦提县（40.48°N，80.45°E）、3：和田县（36.57°N，79.89°E）、4：新疆生产建设兵团第一二七团（塔城地区）（45.07°N，84.38°E）、5：精河县（44.55°N，82.75°E）和6：玛纳斯县（44.61°N，86.29°E），这些点代表了新疆不同种植区域的气候特点和种植特征。



注：以审图号为GS（2019）3333号为底图作图，未对底图进行修改。

图1 研究区选点示意图

Fig. 1 Sketch map of selected points in the study area

1.2 @RISK软件及评估方法

@RISK7.6是由Palisade公司开发，采用蒙特卡罗（Monte Carlo）模拟（又称随机抽样）来执行风险分析的软件，它可以客观的自动计算并模拟不同的设计方案，在有不确定因素的条件下帮助用户做出最好的决策；并提供灵敏度分析和方案分析的功能，以确定模型中的关键因素[26]。为了使模拟结果更加精确，本模型中设置迭代次数为100000，模拟次数为1。

1.3 棉铃虫对新疆棉花潜在经济损失评估模型

1.3.1 模拟场景 根据Qiao[27]整理和分析的中国抗虫棉比例，2012年新疆抗虫棉约占总植棉面积的60%。考虑到抗虫棉种植面积逐年变化，本研究中考虑了2种场景，即未来种植常规棉花和种植转基因抗虫棉，同时考虑在2种棉花品种类型的基础上，分别采用害虫综合治理策略（IPM）和常规防治（只使用化学农药的防治）。

李小勇[28]认为，新疆生产建设兵团（以下简称兵团）相比新疆维吾尔自治区（以下简称地方）种植棉花有两方面优势，一是兵团种植棉花单位面积产量高，二是成本相对较便宜，这与兵团在有害生物管理中采用IPM有密切关系。根据新疆生产建设兵团2014—2018农业统计年鉴[29]，兵团棉花种植面积占新疆总种植面积的35%，棉花产量占新疆总产量的40%。综上所述，结合目前新疆棉花种植情况（兵团主要采用综合防治，地方采用化学防治为主）。我们也假定未来地方采用常规管理办法，新疆生产建设兵团单位采用IPM。本文中IPM重点考虑农药合理利用（如害虫化学防治频次变化）。

模拟场景设置如图2所示。

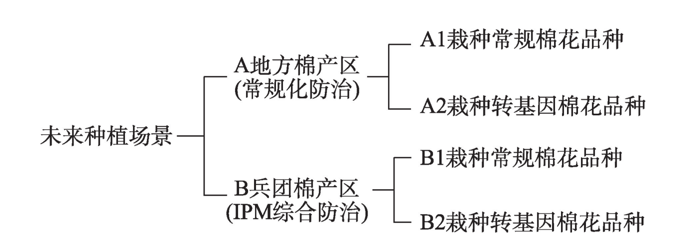


图2 模拟场景设置

Fig. 2 Simulation scenarios

1.3.2 模拟场景下的潜在经济损失总量模型 以A_1为例，此场景下棉铃虫造成的直接经济损失(F)，主要包括三方面的内容：棉花产量下降引起的经济损失(F_1)，质量下降引起的经济损失(F_2)和进行常规化管理后所投入的防治费用(F_3)。其公式为：

$$F = F_1 + F_2 + F_3$$

（1）棉花产量下降引起的经济损失F_1：

棉铃虫危害棉花后所造成的棉花产量下降的经济损失模型为：

$$F_1 = Q_1 \times I \times R \times P_c/(1 - IR)$$

式中：Q_1为棉铃虫适生区内棉花的年产量，单位为t；I为棉铃虫对棉花的危害率(%)；R为棉花受棉铃虫危害后的产量损失率(%)；P_c为棉花的市场价格，单位为元·千克$^{-1}$。其中，棉铃虫适生区内棉花的年产量(Q_1)指仅在适生区内种植棉花的年产量。棉铃虫对棉花的危害率(I)指棉铃虫为害的棉花种植面积占棉花种植面积的比率。棉花受棉铃虫危害后的产量损失率(R)指被棉铃虫危害前后的棉花年产量的比值。棉花的市场价格(P_c)是未受到棉铃虫危害时的市场价格。

（2）棉花质量下降引起的经济损失F_2：

由棉铃虫危害棉花后造成的棉花质量下降的经济损失模型为：

$$F_2 = Q_1 \times I \times (1 - R)(P_c - P_2)/(1 - IR)$$

式中：P_2为棉花质量下降时的棉花市场价格，单位为元·千克$^{-1}$。

（3）防治费用F_3支出量：

防治费用支出是指为防治棉铃虫所投入的防治总费用：包括农药、劳务费、机械喷药等费用。

$$F_3 = S \times I \times C$$

式中：S为棉铃虫适生区内棉花种植面积，单位hm^2；C为单位面积棉花产区的防治成本，单位为元·hm^{-2}。

其中，棉铃虫适生区中棉花的种植面积指仅在适生区内棉花的种植面积。棉花产区的防治成本指单位面积内防治棉铃虫而投入的防治费用。

1.4 模型灵敏性分析

灵敏度分析是评价一个系统或模型的输出变化对其参数或周围条件敏感程度的方法[15]。本文采用@RISK软件中的灵敏度分析，是通过比较输入因素回归系数的大小来表明其影响程度。

1.5 棉铃虫对新疆棉花产业造成潜在经济损失评估模型中参数的确定

本文中所提到的经济损失平均值，是指模拟结果中从最小值到最大值排列后所取的中位数(表1)。为了使模拟结果更接近实际情况，本研究采用概率分布中的Pert分布。

表1 模型参数设定

Tab. 1 The setting of model parameter

模型参数	最小值	平均值	最大值	备注
棉铃虫适生区棉花的种植面积(S)/10^4 hm^2	127.62	153.34	170.22	地方
	68.72	82.40	91.65	兵团
棉铃虫适生区棉花的年产量(Q_1)/10^4 t	220.62	290.31	336.30	地方
	147.08	193.54	224.20	兵团
棉铃虫对棉花的危害率(I)[30]/%	5.00	25.00	32.00	常规棉花
	5.00	8.00	15.00	抗虫棉
棉铃虫危害后的产量损失率(R)[31-32]/%	5.00	17.00	30.00	常规棉花
	5.00	7.00	10.00	抗虫棉
棉花市场价格(P_c)/(元·千克$^{-1}$)[33]	5.70	7.25	8.36	-
品质下降时棉花的市场价格(P_2)/(元·千克$^{-1}$)	5.70	6.48	7.25	-
单位棉花疫区防治成本(C)/(元·hm^{-2})	735	2025	3705	地方棉区栽种常规棉花
	420	1125	1980	兵团棉区栽种常规棉花
	525	1290	3000	地方棉区栽种抗虫棉
	210	570	1350	兵团棉区栽种抗虫棉

注：1. 新疆地方和兵团的棉花种植面积是从国家统计年鉴和地方统计局获得[29,34-35]，表格中的数据是近10 a数据结合中国农业农村部相关文件[36]利用多项式趋势线(R^2>0.95)推算出的未来新疆种植棉花的面积；2. 新疆棉花年产量数据获取方式同“1”；3. 我们假定当棉花受棉铃虫危害后品质下降，其价格可以用棉花正常市场价格的一半作为数据集[15]；4. 通过国家棉花市场监测系统公布的数据[33]，结合新疆实际情况，推算出不同管理模式下单位棉花疫区防治成本（主要考虑农药打药次数和成本，劳动力成本）；5. 棉铃虫对棉花的危害率及危害后的产量损失率来源于研究文献[30-32]及新疆生产建设兵团一二一团植保站提供的历年统计数据。

2　结果与分析

2.1　新疆典型区域棉铃虫CLIMEX模型周生长指数GIw对比

从图3可以看出，除了和田县外，5个区域棉铃虫的周生长指数GIw在1975年首次变化出现的时间是在第120 d附近。2100年出现时间有不同程度的提前。其中，2100年新疆南部（南疆）区域麦盖提县和阿瓦提县棉铃虫的GIw首次变化出现在第90 d附近（4月初），新疆北部（北疆）的GIw则出现在第105 d附近（即4月中旬）。和田县棉铃虫的GIw变化情况可能与模型中设置的温度及降雨有关。GIw首次变化日期提前，很可能导致棉铃虫越冬蛹提前羽化。

2.2　4种场景下棉铃虫对新疆棉花的潜在经济损失

对种植常规棉花场景下2种管理模式分别进行模拟，结果如表2所示。该场景下棉铃虫造成的潜在经济损失总量为15.25×10^{8}~32.99×10^{8}元，平均值为23.37×10^{8}元。对种植转基因抗虫棉场景下2种管理模式分别进行模拟，得到表2中的结果。种植转基因抗虫棉场景下棉铃虫造成的潜在经济损失总量为3.08×10^{8}~6.36×10^{8}元，平均值为4.33×10^{8}元，转基因棉花可以节约81.47%的经济损失。

2.3　2种场景下不同管理模式的比较

对2种场景下不同管理模式下单位面积的经济

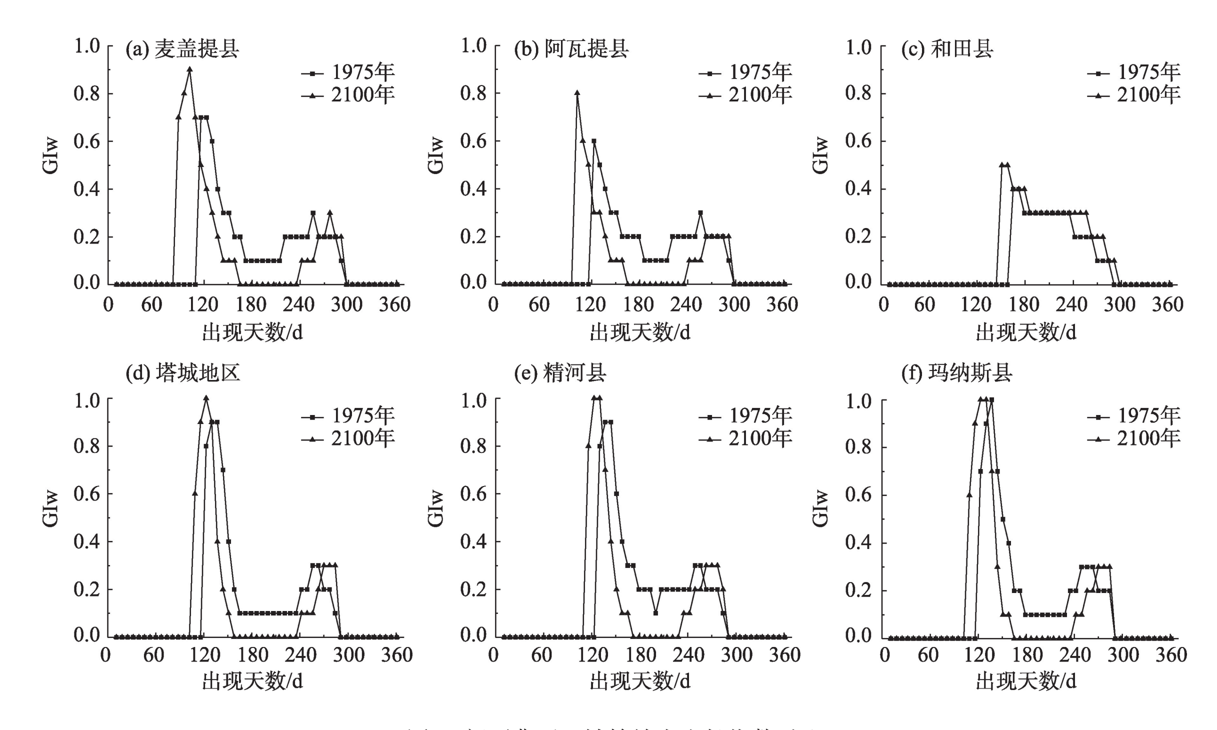


图3　新疆典型区域棉铃虫生长指数对比

Fig. 3　Comparison of weekly growth index（GIw）of *Helicoverpa amigera* among typical regions in Xinjiang, China

表2　4种场景下的潜在经济损失评估

Tab. 2　Potential economic loss in four scenarios　　/10^{4}元

种植场景	输出	常规管理			IPM管理		
		最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值
常规棉花	产量下降引起的经济损失F_1	37905.79	80671.34	142835.84	25158.63	53842.67	95108.96
	质量下降引起的经济损失F_2	5.98	43.12	102.12	4.04	28.77	67.98
	防治费用F_3	34885.88	70168.70	118012.88	10532.90	20816.60	34524.49
	总经济损失F	84505.05	154948.50	241735.71	40364.12	76314.35	123317.05
抗虫棉	产量下降引起的经济损失F_1	7908.32	12416.05	19236.87	5267.50	8276.60	12863.24
	质量下降引起的经济损失F_2	2.50	17.85	41.61	1.71	11.92	27.89
	防治费用F_3	9026.19	17986.01	32815.57	2065.42	4264.82	7905.52
	总经济损失F	18870.35	30876.36	49558.43	8222.16	12815.31	19635.79

损失进行了计算，由图4可知：种植常规棉花场景下并采用IPM管理，棉铃虫造成单位面积的经济损失平均比常规管理减少84.45~402.6元·hm^{-2}；而抗虫棉场景下并采用IPM管理时，单位面积经济损失比常规管理减少45.9~101.7元·hm^{-2}。

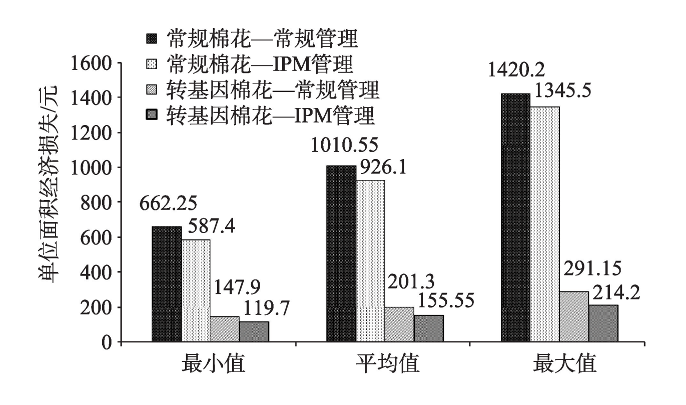


图4 2种场景下不同管理模式单位面积的经济损失

Fig. 4 Economic loss per hectare cotton under the different management patterns in two scenarios

2.4 2种场景下棉铃虫对新疆棉花潜在经济损失的灵敏度分析

在种植常规棉花场景中，2种管理模式下不同影响因子的回归系数比较接近，故无法准确评估不同因子对经济损失的影响程度，在种植抗虫棉情景下的2种管理模式也有类似的情况，故本研究只讨论以下2种场景下不同因子的回归系数差异（图5）。对2种场景下的潜在经济损失进行灵敏度分析，2种场景下棉铃虫对棉花的危害率回归系数最大，说明棉铃虫的危害率是影响潜在经济损失最敏感的因素；种植常规棉花场景下，相比防治成本对经济损失的影响，产量损失率的影响更大；而种植抗虫棉场景下，棉铃虫得到有效的控制，棉花产量损失率对经济损失影响降低，防治成本的影响升高。

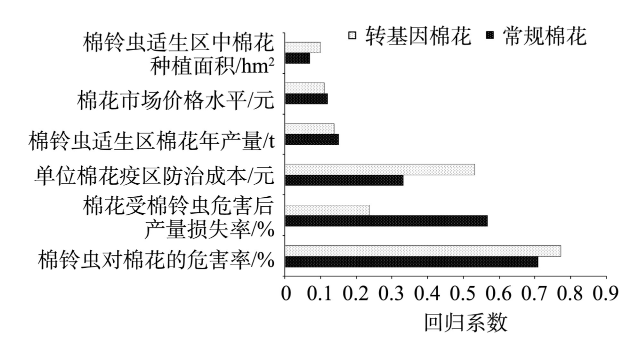


图5 2种场景下棉铃虫对新疆棉花的潜在经济损失灵敏度分析结果

Fig. 5 Sensitivity analysis on potential economic loss of cotton bollworm to Xinjiang cotton in two scenarios

3 讨论

3.1 未来棉铃虫发生动态分析

Qiao等[27,37]的研究结论表明，棉铃虫的发生动态与经济损失的波动性有关，本研究中2种场景下棉铃虫对棉花的危害率对潜在经济损失的影响也印证了这一结论。图2中棉铃虫周生长指数的变化表明棉铃虫的发生动态和气候变化紧密相关，Gu等[38]研究发现，随着全球春季变暖，倒春寒事件发生的频率和持续时间减少，导致新疆棉铃虫的种群发生。吕昭智等[39]对新疆北部20 a棉花物候进行了分析，结果显示棉花发育期的日度累计值以4~5 a为周期变化，这与棉铃虫的种群的周期性存在一定的相关性，已有的研究表明，新疆的棉铃虫的大发生存在5~7 a周期性[30]。气候变化导致棉铃虫种群数量增加，适宜的环境条件使棉铃虫对棉花的危害率上升，潜在经济损失将会更加严重，新疆未来应加强抗虫棉的推广，有效降低棉铃虫的危害和经济损失。

3.2 种植抗虫棉的经济效益分析

根据中国农业农村部发布的各地区棉花病虫害发生防治及挽回损失，新疆棉花病虫害造成的经济损失在45×10^8~63×10^8元左右[40]，本文中估算棉铃虫造成的经济损失为15.25×10^8~32.99×10^8元，结果在其报道的经济损失范围内，主要是本研究没有考虑棉花病害和其他有害生物造成的经济损失。乔方彬[41]的研究表明，转基因抗虫棉的效益在中国是可持续的，与本文关于未来经济效益趋势的结论相符，即新疆种植抗虫棉可以有效降低棉铃虫造成的经济损失。Graham等[42]分析了全球大豆，玉米，棉花和油菜的四种主要农作物1996—2016年间种植转基因作物的收益，转基因作物的平均收益提高了5%~11%；美国种植转基因玉米后，美洲棉铃虫（*Helicoverpa zea*）的数量显著下降，农药施用量下降了79%[43-44]；加拿大种植转基因油菜后，其经济收益增加了19%~28%[45]；Wilhelm等[46]对转基因作物的经济影响进行了Meta分析，结果显示采用转基因技术的综合效益显著提高：化学农药的使用减少了37%，农民利润提高了68%。本文的结论也表明：

采用抗虫棉后,新疆植棉使用的农药量下降了34%,农民收益增加了26%。

3.3 管理场景对抗虫棉的影响分析

种植常规棉的场景下,采用IPM的经济损失比常规管理减少84.45~402.6元·hm^{-2};而种植转基因抗虫棉场景下,单位面积采用IPM的经济损失比常规管理减少45.9~101.7元·hm^{-2},这表明在种植常规棉和抗虫棉2种场景下,采用IPM均可以减少棉铃虫造成的经济损失。这与张求东[47]在开展棉花有害生物综合管理技术(IPM)培训中的调查结果一致。盛承发等[48-49]在新疆棉铃虫的生态防治中也提出未来采用IPM,如秋耕冬灌、作物种植结构的调整等措施相结合,能够减少棉铃虫造成的危害。尽管IPM能有效降低棉铃虫造成的经济损失,但世界范围内因虫害造成的经济损失仍居高不下,而且全球部分农业大国农药的使用量并未显著下降,实际上某些地区(如中国和东南亚国家)还有所增加,这主要是由于IPM实施成本较高、见效周期较长、推广力度小等造成的[50]。因此,如何真正的采用IPM并大规模的推广和应用,未来亟需国内外相关领域专家共同探讨[51-52]。

3.4 抗虫棉综合管理及其利用

相对种植常规棉花场景,未来种植转基因抗虫棉的潜在经济损失大幅降低,抗虫棉不仅有效控制了棉铃虫对棉花的危害,而且减少了棉铃虫对其他作物的危害[53-54]。苏军等[37,55]的研究也表明,抗虫棉的种植降低了农药使用量、减少了防治成本。国际上类似研究也有很多,如印度田间的抗虫棉试验、美国亚利桑那州的农场抗虫棉评估、澳大利亚抗虫棉的推广等[56-57]。但随着抗虫棉的大量种植,一些次生害虫(如棉蚜、棉盲蝽、烟粉虱等)因为农药施用量减少而大暴发[58-60],同时,棉铃虫对抗虫棉的抗性风险也在不断增加[61-62]。为了应对可能出现的转基因抗性风险,澳大利亚种植抗虫棉同时采用庇护所策略,有效避免了棉铃虫抗性上升,与IPM相结合,能有效降低棉铃虫和次生害虫对棉花造成的危害[56]。未来转基因作物的种植需要科学的管理手段,在最大限度发挥转基因作物优点的同时,也要解决次生害虫发生和害虫抗性上升等问题[63]。

3.5 研究的局限性

本研究结合新疆棉区实际情况,基于修正后的模型预测了2种场景下棉铃虫的潜在经济损失,结合CLIMEX模型评估不同地区之间的棉铃虫种群的差异性,对未来种植抗虫棉的决策提供一定的参考。但是本文仍存在一些不足:综合防治费用中,缺少其他细节如机械折旧费等的计算,与实际情况相比尚存在一定误差;未来工作可以在调查问卷基础上进一步完善模型,提高对抗虫棉的效益综合评估。

参考文献(References):

[1] 吕昭智, 陈键, 吴志勇, 等. 新疆棉区主要有害生物与可持续发展[J]. 干旱区研究, 1999, 26(3): 28-32. [Lyu Zhaozhi, Chen Jian, Wu Zhiyong, et al. The main pest in Xinjiang cotton region and sustainable development[J]. Arid Zone Research, 1999, 26(3): 28-32.]

[2] 吴孔明, 陆宴辉. 种植Bt棉花可有效控制棉铃虫在我国多作物生态系统中的发生与危害[J]. 中国基础科学, 2009, 11(3): 27-28. [Wu Kongming, Lu Yanhui. Suppression of cotton bollworm in multiple crops in China in areas with Bt toxin-containing cotton[J]. China Basic Science, 2009, 11(3): 27-28.]

[3] 郭三堆, 王远, 孙国清, 等. 中国抗虫棉研发应用二十年[J]. 中国农业科学, 2015, 48(17): 3372-3387. [Guo Sandui, Wang Yuan, Sun Guoqing, et al. Twenty years of research and application of transgenic cotton in China[J]. China Agricultural Sciences, 2015, 48(17): 3372-3387.]

[4] 李雪源, 王俊铎, 梁亚军, 等. 新疆转基因抗虫棉发展回顾、现状及建议[J]. 中国棉花, 2019, 46(8): 4-5, 24. [Li Xueyuan, Wang Junduo, Liang Yajun, et al. Review and proposals of transgenic Bt cotton in Xinjiang[J]. China Cotton, 2019, 46(8): 4-5, 24.]

[5] 刘伟, 姜逢清, 李小兰. 新疆气候变化的适应能力时空演化特征[J]. 干旱区研究, 2017, 34(3): 531-540. [Liu Wei, Jiang Fengqing, Li Xiaolan. Spatiotemporal evolution of adaptive capacity to climate change in Xinjiang[D]. Arid Zone Research, 2017, 34(3): 531-540.]

[6] 陈娟, 刘普幸. 胡杨叶黄期对气候变化的时空响应与区域差异[J]. 干旱区研究, 2019, 36(1): 162-171. [Chen Juan, Liu Puxing. The spatiotemporal responses and regional differential of leaf-yellow period of *Populus euphratica* to climatic change in Chinese oases. [J] Arid Zone Research, 2019, 36(1): 162-171.]

[7] 朱剑, 李保平, 孟玲. 气候变暖对我国棉铃虫适生分布区的模拟预测[J]. 生态学杂志, 2011, 30(7): 1382-1387. [Zhu Jian, Li Baoping, Meng Ling. Simulation and prediction of potential distribution of *Helicoverpa armigera* in China under global[J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(7): 1382-1387.]

[8] 贾建英, 韩兰英, 万信, 等. 甘肃省冬小麦干旱灾害风险评估及其区划[J]. 干旱区研究, 2019, 36(6): 1478-1486. [Jia Jianying, Han Lanying, Wan Xin, et al. Risk assessment and regionalization

of winter wheat drought in Gansu Province[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(6): 1478–1486.]

[9] 赵阿兴, 马宗晋. 自然灾害损失评估指标体系的研究[J]. 自然灾害学报, 1993, 2(3): 1–7. [Zhao Axing, Ma Zongjin. Appraising study for the loss evaluation system of natural disasters[J]. Journal of Natural Disasters, 1993, 2(3): 1–7.]

[10] 曾士迈. 植保系统工程导论[M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1994: 184–186. [Zeng Shimai. Introduction to Plant Protection System Engineering[M]. Beijing: Beijing Agricultural University Press, 1994: 184–186.]

[11] Cook D C, Carrasco L R, Paini D R, et al. Estimating the social welfare effects of New Zealand apple imports[J] Australian Journal of Agricultural & Resource Economics, 2011, 55(4): 599–620.

[12] Ros G D, Conci S, Pantezzi T, et al. The economic impact of invasive pest *Drosophila suzukii* on berry production in the Province of Trento, Italy[J]. Journal of Berry Research, 2015, 5(2) : 89–96.

[13] Taylor A S, Cook D C. An economic assessment of the impact on the Western Australian viticulture industry from the incursion of grapevine downy mildew[J]. Journal of Plant Diseases & Protection, 2018, 125(4): 1–7.

[14] 马兴莉, 李志红, 胡学难, 等. 橘小实蝇、瓜实蝇和南亚果实蝇对广东省造成的经济损失评估[J]. 植物检疫, 2013, 27(3): 50–56. [Ma Xingli, Li Zhihong, Hu Xuenan, et al. The assessment of the economic losses caused by *Bactrocera dorsalis*, *B. cucurbitae* and *B. tau* to Guangdong province[J]. Plant Quarantine, 2013, 27(3): 50–56.]

[15] 孙宏禹, 秦誉嘉, 李志红, 等. 基于@RISK的瓜实蝇对我国苦瓜产业的潜在经济损失评估[J]. 植物检疫, 2018, 32(6): 64–69. [Sun Hongyu, Qin Yujia, Li Zhihong, et al. The potential economic loss of bitter gourd industry in China caused by *Zeugodacus cucurbitae* (Coquillett) based on @RISK[J]. Plant Quarantine, 2018, 32 (6): 64–69.]

[16] Xi Chao, Jiang Yuying, Gui Furong, et al. The potential distribution analysis and economic loss prediction of *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) in Yunnan Province[J]. Journal of Southern Agriculture, 2019, 50(6): 1226–1233.

[17] 白岩, 王桂峰, 董文全, 等. 基于"两河流域"棉区变迁分析的棉花生产发展研究[J]. 中国棉花, 2018, 45(5): 1–3, 35. [Bai Yan, Wang Guifeng, Dong Wenquan, et al. Analyses on production changes of cotton region in the Yangtze River Basin and the Yellow River Basin in China [J]. China Cotton, 2018, 45(5): 1–3, 35.]

[18] 傅玮东, 姚艳丽, 毛炜峄. 棉花生长期的气候变化对棉花生产的影响——以新疆昌吉回族自治州为例[J]. 干旱区研究, 2009, 26(1): 142–148. [Fu weidong, Yao Yanli, Mao Weiyi. Climate change in the period from April to October for the last 45 years in the primary cotton-growing region of Changji Hui autonomous prefecture and its effect on cotton production[J]. Arid Zone Research, 2009, 26(1): 142–148.]

[19] 薛亚荣, 巴特尔·巴克, 罗那那, 等. 塔城地区棉花生育期需水量变化的气候响应[J]. 干旱区研究, 2018, 35(5): 1192–1198. [Xue Yarong, Bake Batur, Luo Nana, et al. Climate response to water demand of cotton plant in growing season in Tacheng Prefecture [J]. Arid Zone Research, 2018, 35(5): 1192–1198.]

[20] 杨忠娜, 唐继军, 喻晓玲. 新疆棉花产业对国民经济的影响及对策研究[J]. 农业现代化研究, 2013, 34(3): 298–302. [Yang Zhongna, Tang Jijun, Yu Xiaoling. Xinjiang cotton industry present situation and countermeasure research[J]. Research of Agricultural Modernization, 2013, 34(3): 298–302.]

[21] 吕昭智, 李惠英. 新疆棉区主要有害生物与可持续发展[J]. 中国棉花, 2000, 27(2): 46–47. [Lyu Zhaozhi, Li Huiying. The main pest in Xinjiang cotton region and sustainable development[J]. China Cotton, 2000, 27(2): 46–47.]

[22] Sutherst R W, Maywald G F. A climate model of the red imported fire ant, *Solenopsis invicta* Buren (Hymenoptera: Formicidae): Implications for invasion of new regions, particularly Oceania[J]. Environmental Entomology, 2005, 34(2): 317–335.

[23] Kriticos D J, Ota N, Zalucki M P, et al. The potential distribution of invading *Helicoverpa armigera* in North America: Is it just a matter of time?[J] PLoS ONE, 2015, 10(3): e0119618.

[24] 马有绚, 张武, 张立祯. 近30年我国棉花需水特征[J]. 应用生态学报, 2016, 27(5): 1541–1552. [Ma Youxuan, Zhang Wu, Zhang Lizhen. Cotton water requirement character during recent 30 years in China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(5): 1541–1552.]

[25] 陈超, 庞艳梅, 潘学标, 等. 1961—2012年中国棉花需水量的变化特征[J]. 自然资源学报, 2015, 30(12): 2107–2119. [Chen Chao, Pang Yanmei, Pan Xuebiao, et al. Variation characteristics of water requirement of cotton in China during 1961–2012[J]. Journal of natural resources, 2015, 30(12): 2107–2119.]

[26] @RISK. Palisade Corporation Guide to Using@RISK. [EB/OL]. https: //www. palisade. com/risk, 2018–10–20.

[27] Qiao Fangbin. Fifteen years of Bt cotton in China: The economic impact and its dynamics[J]. World Development, 2015, 70: 177–185.

[28] 李小勇. 基于国内外比较的新疆兵团棉花成本收益及补贴政策研究[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2017. [Li Xiaoyong. At Home and Abroad Based on the Comparison of Cost Benefit and Xinjiang Production and Construction Corps Cotton Subsidy Policy Research [D]. Aral: Tarim University, 2017.]

[29] 新疆生产建设兵团统计局. 新疆统计年鉴[EB/OL]. http: //tjj.xjbt.gov.cn/zwfw/sjcx/, 2018–10–20. [Xinjiang Production and Construction Corps. Xinjiang Statistical Yearboor][EB/OL]. http://tjj.xjbt.gov.en/zwfusicxl, 2018–10–20.]

[30] 姜玉英, 陆宴辉, 李晶, 等. 新疆棉花病虫害演变动态及其影响因子分析[J]. 中国植保导刊, 2015, 35(11): 43–48. [Jiang Yuying, Lu Yanhui, Li Jing, et al. Evolution of cotton diseases and insect pests in Xinjiang and analysis of its influencing factors[J]. China Plant Protection, 2015, 35(11): 43–48.]

[31] 陆承志. 南疆不同类型棉田第一代棉铃虫为害规律及其防治[J]. 中国棉花, 2005, 32(1): 24-25. [Lu Chengzhi. The damage law and prevention of the first generation cotton bollworm in different types of cotton fields in southern Xinjiang[J]. China Cotton, 2005, 32(1): 24-25.]

[32] 房雪, GE Saiying, 张永生, 等. 1991—2010年中国棉花病虫害经济损失分析[J]. 应用昆虫学报, 2014, 51(4): 1104-1113. [Fang Xue, GE Saiying, Zhang Yongsheng, et al. Analysis of economic loss from pest insects and plant disease in cotton of China during 1991-2000 [J]. Chinese Journal of Applied Entomology, 2014, 51(4): 1104-1113.]

[33] 国家棉花市场监测系统. 棉花市场价格数据. [EB/OL]. http: //www. cncotton. com/sy_59/scbg/gjmhscjcxt/, 2018-10-20. [National Cotton Market Monitoring System. Cotton market price data. [EB/OL]. http: //www.cncotton.com/sy_59/scbg/gjmhscjcxt/, 2018-10-20.]

[34] 国家统计局. 中国统计年鉴 [EB/OL]. http: //www. stats. gov. cn/tjsj/ndsj/, 2018-10-20. [National Bureau of Statistics. China Statistical Yearbook[EB/OL]. http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/, 2018-10-20.]

[35] 国家统计局. 关于2018年棉花产量的公告. [EB/OL]. http: //www. stats. gov. cn/tjsj/zxfb/201812/t20181229_1642170. html, 2018-10-20. [National Bureau of Statistics. Announcement on cotton production in 2018[EB/OL]. http: //www. stats. gov. cn/tjsj/zxfb/201812/t20181229_1642170. html, 2018-10-20.]

[36] 中华人民共和国农业农村部. 农业农村部办公厅关于印发《2019年种植业工作要点》. [EB/OL]. http: //www. moa. gov. cn/ztzl/2019gzzd/sjgzyd/201903/t20190315_6176675. htm, 2018-10-20. [Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. The general office of the ministry of agriculture and rural affairs on the issuance of the "Key points of planting industry in 2019" [EB/OL]. http: //www. moa. gov. cn/ztzl/2019gzzd/sjgzyd/201903/t20190315_6176675. htm, 2018-10-20.]

[37] 苏军, 黄季焜, 乔方彬. 转Bt基因抗虫棉生产的经济效益分析[J]. 农业技术经济, 2000(5): 26-31. [Su Jun, Huang Jikun, Qiao Fangbin. Analysis of economic benefits of Bt gene-resistant cotton production[J]. Journal of Agrotechnical Economics, 2000(5): 26-31.]

[38] Gu Shimin, Han Peng, Lyu Zhaozhi, et al. Climate change favours a destructive agricultural pest in temperate regions: Late spring cold matters[J]. Journal of Pest Science, 2018, 91(4): 1191-1198.

[39] 吕昭智, 李莉, 田长彦, 等. 新疆北部20年棉花物候计算和分析——以炮台镇为例[J]. 干旱区地理, 2003, 26(4): 340-344. [Lyu Zhaozhi, Li Li, Tian Changyan, et al. Calculation and analysis of cotton phenology in the Northern of Xinjiang [J]. Arid Land Geography, 2003, 26(4): 340-344.]

[40] 宁启文, 胡乐鸣. 各地区农作物病虫害发生、防治面积及损失情况(一)[Z]. 北京: 中国农业年鉴, 2017: 621. [Ning Qiwen, Hu Leming. Occurrence, Control Area and Loss of Crop Diseases and Insect Pests in Various Regions[Z]. Beijing: China Agriculture Yearbook, 2017: 621.]

[41] 乔方彬. 转基因抗虫棉经济效益可持续性研究[J]. 中国科学: 生命科学, 2018, 48(12): 1330-1342. [Qiao Fangbin. Sustainability of the economic benefit of Bt cotton[J]. Scientia Sinica(Vitae), 2018, 48(12): 1330-1342.]

[42] Graham B, Peter B. Farm income and production impacts of using GM crop technology 1996-2016[J]. GM Crops & Food, 2018, 9(3): 1-31.

[43] Dively G P, Venugopal P D, Bean D, et al. Regional pest suppression associated with widespread Bt maize adoption benefits vegetable growers[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2018, 115(13): 201720692.

[44] Perry E D, Ciliberto F, Hennessy D A, et al. Genetically engineered crops and pesticide use in U. S. maize and soybeans[J]. Science Advances, 2016, 2(8): e1600850-e1600850.

[45] Gusta M, Smyth S J, Belcher K, et al. Economic benefits of genetically-modified herbicide-tolerant canola for producers[J]. Agbioforum, 2003, 14(1): 1-13.

[46] Wilhelm K, Qaim M. A meta-analysis of the impacts of genetically modified crops[J]. Plos One, 2014, 9(11): e111629.

[47] 张求东. 农民田间学校的实施效果及推广方法评价[D]. 武汉: 华中农业大学, 2006. [Zhang Qiudong. Implementation Effect and Extension Approach Assessment of Farmer Field Schools [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2006.]

[48] 盛承发, 苏建伟, 宣维健, 等. 新疆棉铃虫的生态防治[J]. 中国生态农业学报, 2002, 10(2): 116-118. [Sheng Chengfa, Su Jianwei, Xuan Weijian, et al. Ecological management of the cotton bollworm in Xinjiang[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2002, 10(2): 116-118.]

[49] Lyu Zhaozhi, Baker G H. Spatial and temporal dynamics of *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera, Noctuidae) in contrasting agricultural landscapes in northwestern China[J]. International Journal of Pest Management, 2013, 59(1): 25-34.

[50] Heong K L, Cheng J, Escalada M M. Rice Planthoppers: Ecology, Management, Socio Economics and Policy[M]. Hangzhou, Zhejiang University Press, 2015.

[51] 翟保平. 稻飞虱: 国际视野下的中国问题[J]. 应用昆虫学报, 2011, 48(5): 1184-1193. [Zhai Baoping. Rice planthoppers: A China problem under the international perspectives [J]. Journal of Applied Entomology, 2011, 48(5): 1184-1193.]

[52] Fitt G P. An Australian approach to IPM in cotton: Integrating new technologies to minimise insecticide dependence[J]. Crop Protection, 2000, 19(8): 793-800.

[53] Wu Kongming, Lu Yanhui, Hong Qiang, et al. Suppression of cotton bollworm in multiple crops in China in areas with Bt toxin-containing cotton[J]. Science, 2008, 321(5896): 1676-1684.

[54] Zhao J H, Ho P, Azadi H. Benefits of Bt cotton counterbalanced by secondary pests? Perceptions of ecological change in China[J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2011, 173(1-4): 985-994.

[55] Pray C, Huang J K, Hu R, et al. Five years of Bt cotton in China-the benefits continue[J]. Plant Journal, 2002, 31(4): 423–430.

[56] Baker G H, Tann C R. Refuge crop performance as part of the Bt resistance management strategy for *Helicoverpa* spp. (Lepidoptera: Noctuidae) in Australian cotton production systems[J]. Australian Journal of Entomology, 2014, 53(2): 240–247.

[57] Cattaneo M G, Yafuso C, Schmidt C A, et al. Farm-scale evaluation of the impacts of transgenic cotton on biodiversity, pesticide use, and yield[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2006, 103(20): 7571–7576.

[58] Qaim M, Zilberman D. Yield effects of genetically modified crops in developing countries[J]. Science, 2003, 299(5608): 900–902.

[59] Wu Kongming, Feng H, Guo Y. Seasonal abundance of the mirids, *Lygus lucorum* and *Adelphocoris* spp. (Hemiptera: Miridae) on Bt cotton in northern China[J]. Crop Protection, 2002, 21(10): 997–1002.

[60] 吴孔明, 陆宴辉, 王振营. 我国农业害虫综合防治研究现状与展望[J]. 昆虫知识, 2009, 46(6): 831–836. [Wu Kongming, Lu Yanhui, Wang Zhenying. Advance in integrated pest management of crops in China[J]. Chinese Bulletin of Entomology, 2009, 46(6): 831–836.]

[61] Tabashnik B E, Gassmann A J, Crowder D W, et al. Insect resistance to Bt crops: Evidence versus theory[J]. Nature Biotechnology, 2008, 26(2): 199–202.

[62] Lu Z Z, Zalucki M P, Perkins L E, et al. Towards a resistance management strategy for *Helicoverpa armigera* in Bt-cotton in northwestern China: An assessment of potential refuge crops[J]. Journal of Pest Science, 2013, 86(4): 695–703.

[63] Downes S, Mahon R J, Olsen K, et al. Monitoring and adaptive resistance management in Australia for Bt-cotton: Current status and future challenges[J]. Journal of Invertebrate Pathology, 2007, 95(3): 208–213.

Analysis on risk assessment of Bt cotton planting in Xinjiang

WANG Zhenlin[1,2], LYU Zhaozhi[1], ZHANG Xin[1], LIU Yongjian[3]

(1. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Chinese Academy of Sciences, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; 3. Xinjiang Production and Construction Corps, Eighth Division, No. 121 Regiment Agriculture Development Service Center, Shihezi 832000, Xinjiang, China)

Abstract: The potential economic losses caused by cotton bollworm (*Helicoverpa amigera*) in different scenarios in the cotton area of the autonomous region of Xinjiang, China, were evaluated. Data were obtained based on the biology and population dynamics of the cotton bollworm in Xinjiang over many years, in addition to cotton planting area, yield, cotton market price and costs of management of cotton bollworm and were analyzed using a population simulation method (CLIMEX model) and a random simulation method (@RISK). The simulation of the population dynamics of the cotton bollworm suggests that the weekly growth index (GIw) of this pest in Xinjiang will increase, and that the dates of emergence of overwintering pupa are clearly advanced. Global warming may exacerbate the damage and economic loss. The @RISK model simulation shows that Bt cotton can effectively suppress the cotton bollworm in this area and reduce the prevention and management costs for this pest per unit area. Our findings indicate that planting of Bt cotton combined with integrated pest management in Xinjiang can reduce the possible economical loss caused by cotton bollworm and secondary pests in the future.

Keywords: cotton bollworm; CLIMEX; Bt cotton; IPM; @RISK